

日経サイエンス

SCIENTIFIC
AMERICAN
日本版

2005年7月1日発行 毎月1回1日発行
第35巻第7号 通巻 405号
1971年11月2日第三種郵便物認可

2005
定価
1400円 07

地磁気はなぜ反転するのか? 見えてきた内部磁場の動き

迷惑メール撃退の新技術

少ない遺伝子でOK!

ゲノムを多重活用する仕組み

広島大学 西図書館
00042439 20050527
日経サイエンス / 日経サイエンス社 <0917009X>

35(7) -34, 35(2~7)



a 20158441a

不確実な未来に対処する

超電導の常識を破った 二ホウ化マグネシウム

青山学院大学の秋光純教授らが2001年に発見した新現象は世界に衝撃を与えた
その後4年間の研究でこの超電導体の特性が詳しく解明され
応用面でも大きな期待が寄せられるようになってきた

P. C. キャンフィールド／S. L. バドコ (米エネルギー省エイムズ研究所)

想像してほしい。裏庭をぶらついていたら、見慣れた一角に不意に金脈を見つけた。ウサギを狙ったはずの鉄砲の弾が外れて石油を掘り当てた『じゃじゃ馬億万長者』、ジェド・クランベットの気分といってもよい。それに似た、懷疑心の入り混じった興奮の嵐が2001年初め、固体物理学界に吹き荒れた。青山学院大学の秋光純（あきみつ・じゅん）教授らが、二ホウ化マグネシウム (MgB_2) が40K (Kは絶対温度の単位ケルビン、0Kは約-273°C) 近い温度で超電導になる、つまり電気抵抗を失うと発表したからだ（秋光純「新しい金属系超電導体の発見」日経サイエンス2001年6月号）。

この単純な化合物は1950年代から研究されていて、実験室の棚に何十年も前から並んでいるありふれた物質だったため、並外れた能力が隠されているなどとは誰も想像していなかった。超電導になる転移温度（臨界温度）が40K（-233°C）というと低温に思えるかもしれないが、これは在来の金属化合物超電導体の約2倍にあたる（研究や産業用によく使われているニオブ系合金の臨界温度は約23K）。これだけ高ければ、これまでニオブ系合金に使われてきた技術よりもずっと安価な冷却技術で十分だ。超電導磁石や送電線への応用が期待できる。

臨界温度の高い超電導体としては銅

酸化物系などの高温超電導体があるが（中には130Kで超電導になるものもある）、 MgB_2 はこれらとは異なり、従来から知られているタイプの超電導体に属する。ただし新種であり、それまでの常識を覆すものだ。臨界温度の高い超電導体を探索する過去数十年の研究の中で、どんな元素の組み合わせを試せばよいかという経験則ができていた。また、在来型の超電導体で実現できる臨界温度は最高で23K程度だろうと考えられてきた。ところが驚いたことに、 MgB_2 はこの経験則を否定し、温度の壁も突き破ってしまった。

新発見を追いかけて

MgB_2 の研究は驚異的速度で進んだ。秋光による発表は2001年1月中旬の会合で行われたが、わずか2カ月後の3月に開かれた米国物理学会の年次大会では、このテーマに関連する約100件の口頭発表がなされ、arxiv.orgには70以上の研究論文が投稿された。

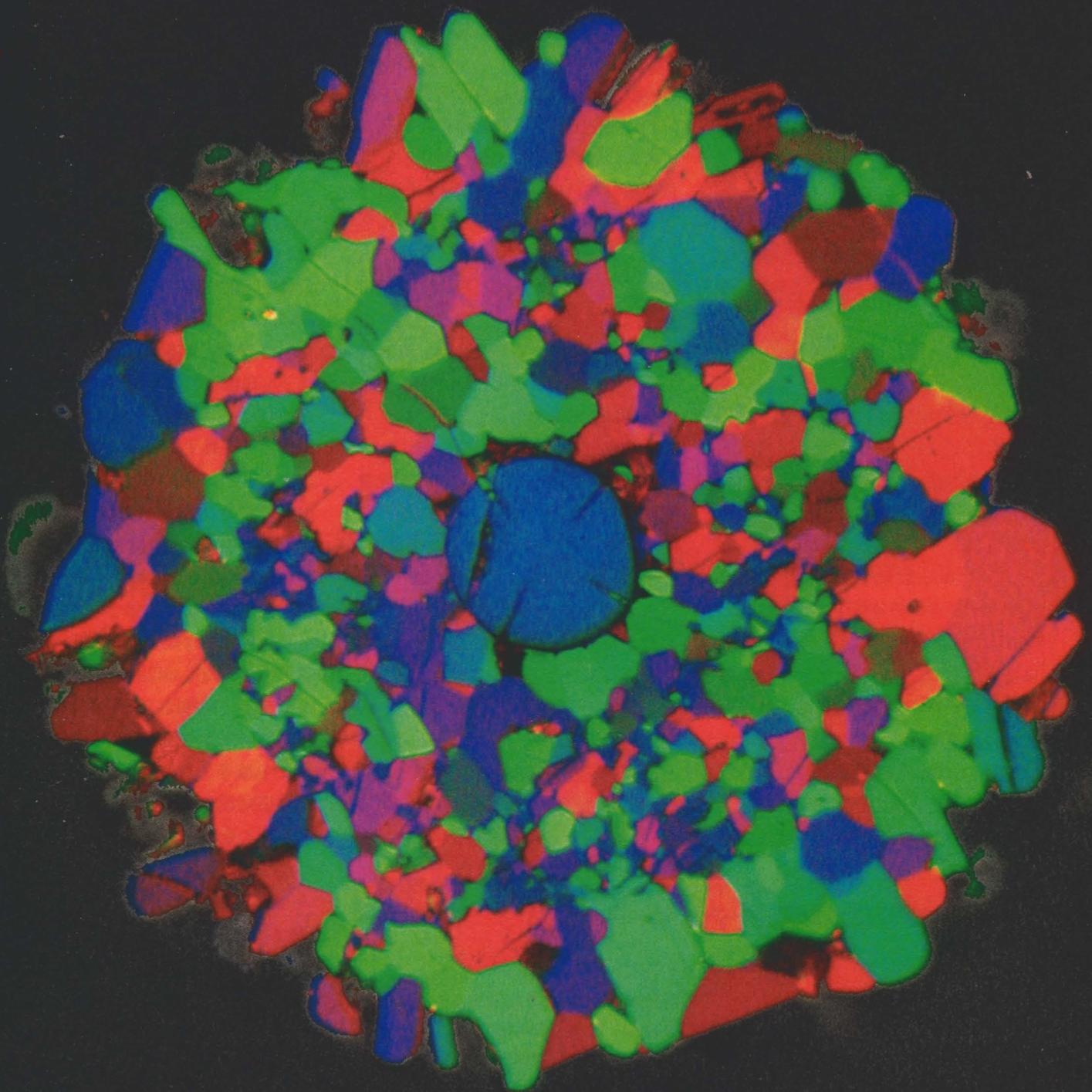
研究が急激に進んだのには、いくつかの理由がある。第1に、いったん方法がわかれれば、比較的純粋な MgB_2 をかなり簡単に作れるとのこと。第2に、2001年には物性物理学界がインターネットによって従来以上に結びつきを強めていたことだ。高い臨界温度を持つ単純な新超電導体への期待がこれらに加わり、一種の混合火薬となっ

て知的爆発を生み出した。

秋光の発表に関するニュースは当初、口づてや電子メールで広まっただけで、研究論文も電子版の草稿も入手できなかつた。私たちは発表の数日後にこのニュースを知り、まずポイントを整理した。この物質の高純度の固体試料を自分たちで作れるか（出来合いの MgB_2 粉末の純度はあまり高くない）。本当に40K近くで超電導になるのが（極めて高い臨界温度を持つと報告されたのに、報告者以外は誰も再現できなかつたUSO（未確認超電導体）が過去20年間にたくさんあつた）。 MgB_2 が本物の超電導体だった場合、そのメカニズムを解明できるだろうか。そして、この化合物の基本的特性の一端を明らかにできるだろうか？ 幸いにも、答えはすべて「イエス」だった。

秋光の発見に関する伝聞をきつがげに、私たちを含め多くの研究グループは大忙しではあるが素晴らしい時間を過ごすこととなった。金属化合物の物理特性を専門に研究していた私たちは早速、別の実験に使っていだすすべての

結晶粒が見せる万華鏡 二ホウ化マグネシウム線材の研磨された断面。直径は0.14mm。基本的にびっしり物質が詰まっており、配向性のない微小な結晶粒からできていることがわかる。結晶粒の向きによって光の反射が異なるため、さまざまな色に見えている。こうした線材は二ホウ化マグネシウムの超電導に関する基礎研究に役立つ。



炉を空にしてMgB₂作りに着手した。

初めのうち、MgB₂を作るのは厄介な作業だった。MgB₂は複数種類の金属元素からなる「金属間化合物」の一種だ。金属間化合物を作るには、成分となる複数の元素と一緒に溶かすのが最も簡単だが、MgB₂ではこの方法が使えない。マグネシウムとホウ素の融点がまるで異なるからだ。マグネシウムの融点は650℃だが、ホウ素は2000℃を超える。また、マグネシウムの沸点は1100℃を少し上回るあたりなので、目的の化合物ができる前に蒸発してしまう。仲間内ではこれを「マグネシウムに足が生えて逃げて行く」と表現している。

しかし、マグネシウムの気化を利用すれば、別の手が可能になる。マグネシウム片と粉末状のホウ素をタンタル製の容器に封入し（タンタルはこれらの元素と反応しない）、マグネシウムの融点以上・沸点以下の温度（例えば950℃くらい）に熱する方法だ。

マグネシウムの蒸気圧は比較的高く、950℃では液状のマグネシウムとともに総量の1/3に当たるマグネシウム蒸気が平衡状態で存在している。私たちはこの濃厚なガスが固体のホウ素の中に拡散してMgB₂の焼結体ができるだろうと考えた。案の定、非常に高純度のMgB₂のもろい焼結体（砂岩に似て

いる）がたった2時間でできた。第一報を聞いてからわずか3日で、私たちはこうした焼結体を作り、40K付近で超電導になることを確かめた。

超電導のメカニズムは？

MgB₂の製法がわかり、超電導も確かめたので、私たちは次の重大なポイントに駒を進めた。超電導になるメカニズムの解明だ。従来の金属系超電導体の振る舞いは「BCS理論」で説明できるが、MgB₂もそうなのか、それとも新しいタイプなのか（68ページの囲み）。もし新タイプなら、科学的に意味深い発見だ。一方、従来どおりのBCS超電導体である場合には、臨界温度が際立って高いことに何らかの説明が必要になるものの、応用面ではさらに期待が高まる。

いくつかの理由から、一部の研究者はMgB₂がBCS理論で説明される一般的な超電導体ではないと考えていた。まず、1986年に高温超電導体が発見されるまでの20年間、臨界温度の最高値が長らく20K付近にとどまっていたという事実がある。このため、BCS理論に従う超電導体については、約30Kが臨界温度の上限だろうと考える理論家もいた。銅酸化物系高温超電導体の臨界温度はずっと高いが、こちらはBCS超電導体とは考えられていない。

第2の理由はMgB₂の臨界温度がそれまでの経験則に反していたことだ。金属間化合物の場合、超電導状態への相転移に寄与する電子の数が多いほど臨界温度（T_c）が高くなるという経験則が過去の研究から得られていた。これに対し、マグネシウムもホウ素も特別多くの電子をもたらすわけではないのに、MgB₂は比較的高い臨界温度を示した。

BCS理論に従う超電導体であるかどうかは、非常に直接的な実験で調べられる。この理論では結晶の格子振動が重要な役割を演じる。重い陽イオンが強いばね（化学結合）によってつながり、結晶格子の格子点に保たれている様子を想像してほしい。熱などの刺激が加わると、これらのイオンは固有の振動数で振動するようになる。BCS理論によると、超電導体の臨界温度はこの格子振動の振動数に比例する。

一方、ワイングラスやギターの弦など身の回りにある品からもわかるように、同じ形をした物体なら、質量の小さな物質でできたもののはうが重い物質で作られたものよりも固有振動数は高くなる。同様に、マグネシウムやホウ素の同位体を使って、つまり質量の異なる原子でMgB₂を作れば、格子振動の振動数が変わり、それに従って臨界温度も変わるはずだ。

ホウ素には安定な同位体が2つある。ホウ素10とホウ素11だ。BCS理論に基づく最も単純な予測によれば、純粋なホウ素10とホウ素11でそれぞれMgB₂試料を作ると、両者の臨界温度には0.85Kの差が生じる。私たちが実際に作った試料では1Kの違いが出た。単純な予測値に比べるとやや大きな差になったが、この点もBCS理論で説明できる。同理論によると、MgB₂の超電導にはマグネシウム原子の振動よりもホウ素の振動のはうが大きく寄与するからだ（69ページの囲み）。

非凡な物質だった二ホウ化マグネシウム

- 2001年、ごく平凡な化合物と思われていた二ホウ化マグネシウムが約40Kで超電導になることが発見された。この温度は同類の金属系物質が超電導になる温度の2倍近い。実質的な動作温度の最高値は20～30K程度だ。
- 20～30Kなら、液体ネオンや液体水素、密閉サイクル式冷凍機で実現できる温度だ。産業分野で超電導体として広く使われているニオブ合金が液体ヘリウムで約4Kにまで冷やす必要があるのに比べ、冷却が容易で安価になる。
- 二ホウ化マグネシウムに炭素などの不純物を添加すると、磁場中や電流を流した状態でも超電導を維持する性質が強まり、ニオブ合金と同程度かむしろ優れた値を示す。超電導磁石や送電線、高感度の磁気センサーなどへの応用が考えられる。

予測値の0.85Kに近いズレが生じたことから、MgB₂もBCS超電導体の一種らしいということがわかった。しかし、臨界温度は他のBCS超電導体に比べて著しく高い。BCS超電導体の臨界温度の上限が約30Kであるとする予測はもはや崩れた。これは吉報だ。というのは、一般に金属系超電導体は銅酸化物系超電導体に比べて取り扱いがずっと容易で、実用的な線材に加工しやすいからだ。

実際、私たちのグループは糸状のホウ素をマグネシウムの蒸気にさらすだけでMgB₂の線材が作れることにすぐに気づいた（右の図）。この線材は焼結体の塊よりもずっと便利で、実験でさまざまな測定をするのに向いているし、磁石などに応用するうえでも使いやすい。

実用性を左右するポイント

超電導は非常に低い温度でしか起らないが、すでに幅広い用途に使われているし、将来はさらに応用が広がるだろう。最もわかりやすい用途は、エネルギー損失や抵抗による熱の発生なしに大電流を流せるという点を利用したもので、一例が20テスラを超える強い磁場を発生する超電導磁石だ（冷蔵庫のドアに仕込まれている磁石に比べると約500倍の強さになる）。それほど強力でない例も含め、これら金属系超電導体の磁石は各種の実験装置や病院の磁気共鳴画像診断装置（MRI）などに使われている。ニオブ系の化合物や合金で作られた超電導磁石の売り上げは増加する一方だ。

大電流を流せる点を生かしたもう1つの用途として提案されているのが、無損失の送電線だ。常電導体でできた送電線に比べ、電流密度のかなり大きな電流を流せる。これまでのところ、銅酸化物系超電導体で試作した送電線を液体窒素で70K程度に冷やして行っ

線材を作る

二ホウ化マグネシウム（MgB₂）の超電導が発表されてから2週間以内に、私たちはこの物質の線材を作る技術を編み出した。マグネシウム蒸気とホウ素を約1000°Cで反応させると、数時間でMgB₂ができる。ホウ素が周囲のマグネシウム蒸気を吸収してMgB₂になる（この過程で著しい膨張が起こる）。湿度の高い日に、乾いたスポンジが空気中の水蒸気を吸収するようなものだ。この方法は長さ数百m単位で売られているホウ素繊維に適用でき、当初の直径が0.1～0.3mmの繊維をMgB₂に変えることに成功している。

こうした線材切片を使うとMgB₂本来の物理特性を測定できるので、基礎研究に非常に役立つ。ただし、実用的な用途に使えるようにするには、導電性と延展性を持った材料で被覆することによって、MgB₂を構造的に支える必要があるだろう（導電性の被覆は、MgB₂の超電導状態が破れた場合に電流を流す受け皿となり、MgB₂が過熱するのを防ぐ役割も果たす）。適切な被覆材はまだ開発されていない。

より一般的な製法としては、いわゆるパウダー・イン・チューブ法（PIT法）がある。マグネシウムとホウ素を粉末にし（あるいはMgB₂の粉末でもよい）、これらを管に詰めてから線状に引き伸ばした後に、化学反応や熱処理によって固体の線材にする。長さ数十mから数百mの研究用試料がこの方法で作られてきた。

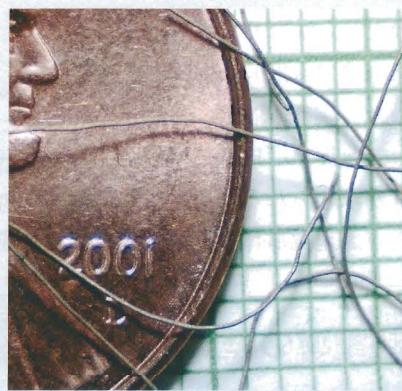
MgB₂は比較的新しい超電導体だが、すでに商品化に向けた取り組みを進めている企業がある。例えばダイボライド・コンダクターズ社やハイパーテックリサーチ社などのベンチャー企業がMgB₂線材の作製や改良に力を入れている。素材メーカーのスペシャリティーマテリアルズはホウ素繊維の製造に実績がある。

（P. C. キャンフィールド／S. L. バドコ）

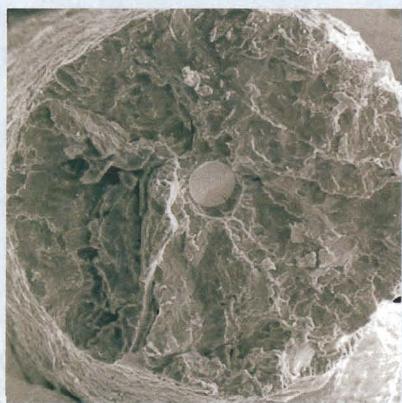
た実験がいくつか成功を収めている。一般的にいって、超電導体を実際に利用するときには、臨界温度T_cよりもかなり低い温度、0.5T_cないし0.7T_cに冷やす必要がある。臨界温度に近い状態では、大電流を流したり強い磁場にさらしたりすると超電導状態が壊れてしまうからだ。臨界温度が20Kの超電

導体なら実際の運用温度は10K程度となり、ここまで冷やすには高価な液体ヘリウムが必要となるため、実用化の足かせともなる。

MgB₂が応用上で注目されているのはこのためだ。現在使われているニオブ系の物質に比べて臨界温度が高く、実際の運用温度まで冷やすのがずっと



マグネシウム蒸気とホウ素繊維を反応させて作ったMgB₂線材。



MgB₂線材を折った断面。中心部に見えるのは直径0.015mmのホウ化タンクステンの芯。

NORMAN E. ANDERSON, JR (top), AND HAL SALSbury Materials Preparation Center, Ames Laboratory (bottom)

簡単なのだ。液体水素や液体ネオンで十分だし、かなり安価な密閉サイクル式冷凍機でも20K以下に冷やせる。

ただ、実際にMgB₂を利用するうえでは、臨界温度以外にも優れた超電導特性が求められる。特に注目されているのが、超電導体の混合状態だ。これ

は磁場の影響で超電導が部分的に壊れている状態のこと、超電導体が実際に使われるときにはたいていがこの状態となる。弱い磁場の中に置いても、超電導体は混合状態にはならない。超電導体が磁場を締め出し、超電導状態が保たれる。しかし、磁場の強さが中

程度になると内部に入り込むようになり、「渦糸」と呼ばれる小さな磁束の管が超電導体の中に生じる。この管の外側は超電導のままだが、内側では超電導が壊れている。

こうした混合状態でも、超電導の有用な特性の多くは保たれる。だが、加

超電導の歴史

超電導の発見は1911年、カマリン・オンネス(Heike Kamerlingh Onnes)が液体ヘリウムを冷却材として金属の低温下での電気特性を調べていたときのことだった。驚いたことに、水銀をおよそ4.2Kまで冷やすと突然、完全に電気抵抗を失ったのだ。常電導から超電導への変化が起こるこの温度は臨界温度(T_c)と呼ばれる。

その後の50年間、より高い臨界温度を持つ物質が徐々にではあるが着実に発見されていった。これらの超電導体はいずれも純粋な金属元素か金属間化合物（複数種類の金属元素でできた化合物）だ。しかし、1960年代から1980年代半ばまでは、臨界温度の最高値は20K台にとどまり、それ以上の上昇は見込めないように思われた。

状況が一変したのは1986年。多数の銅酸化物系化合物が高温超電導を示すことが発見された。その後数年間で臨界温度の最高値は次々と更新され、水銀・バリウム・カルシウム・銅酸化物では約130Kに達した。それは興奮に満ちた素晴らしい時期だったが、超電導のメカニズムを説明する従来のBCS理論(68ページの囲み)ではこれらの物質の超電導を説明できないことが間もなく明らかになった。その後20年に及ぶ努力のか

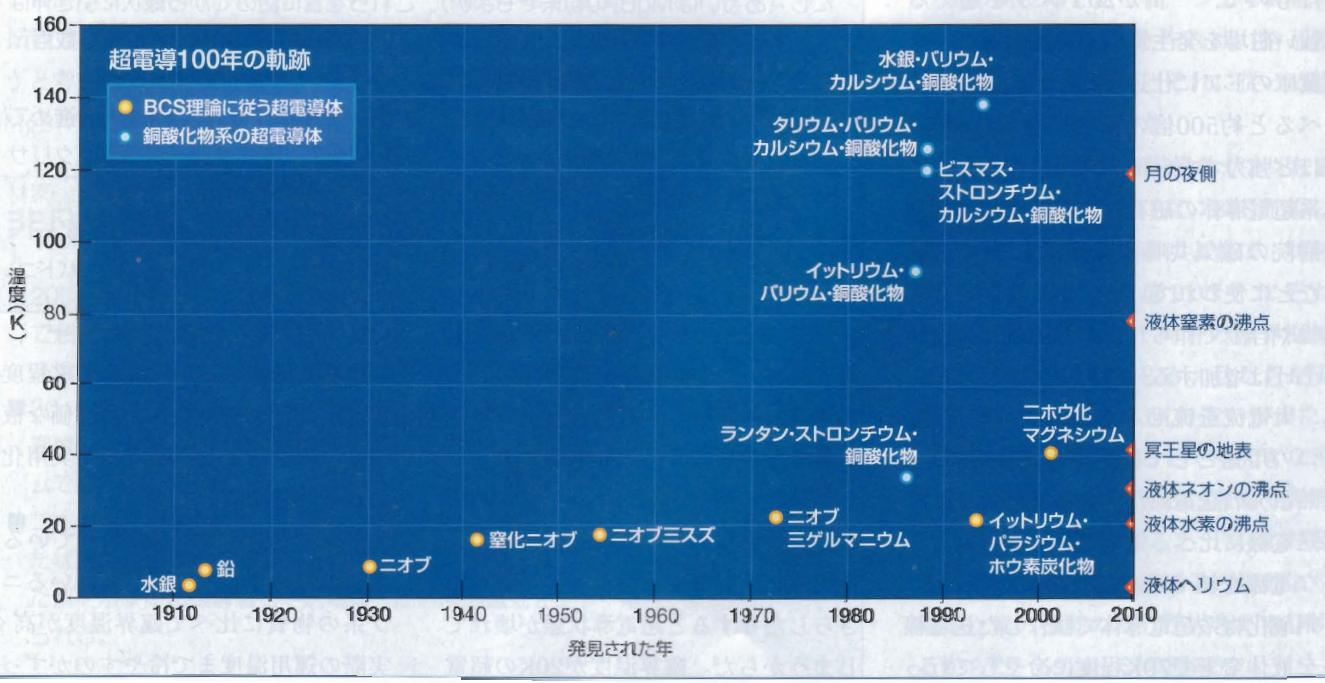
いもなく、銅酸化物系の物質が超電導になる原因や仕組みを説明する決定的な理論はまだ存在しない。

銅酸化物系超電導体は多くの物理的難題をもたらした。まず、高純度の試料を作りにくく、単結晶にもしにくいので、基本的な特性を調べるのが難しい。さらに、線材を作るのも簡単ではない。工学的に使い物になる線材にするには、金属間化合物の超電導体の場合とは違って、個々の結晶粒の向きをそろえる必要があるからだ。こうした問題があるため、より扱いやすい金属間化合物超電導体で、しかも臨界温度が20Kを大幅に上回るものが引き続き望まれてきた。

その後2000年までは、臨界温度を実現するための冷却技術は扱いやすさと費用の点で二極分化の状態だった。酸化物系の場合は約77Kで超電導体として実用化できるものがあり、これは液体窒素に浸することで比較的簡単に冷やす。一方、ニオブミスズなど従来の金属間化合物を実験室や医療用装置の磁石として利用するには4K近くに冷やす必要があり、液体ヘリウムが使われてきた。

そして2001年、ニホウ化マグネシウムが他の金属間化合物の2倍にあたる40Kで超電導になることが発見された。技術者たちが求めていたものが、まさに手に入ったのだ。

(P. C. キャンフィールド／S. L. バドヨ)



える磁場をさらに強めると超電導体の中で磁束の管が占める割合が増し、やがて全体に及んだところで超電導性が完全に失われる。このときの磁場の強さは「上部臨界磁場」と呼ばれ、超電導体が実用上どの程度有用かを左右する重要な特性となっている。

実際に超電導体が応用される場合、中程度の磁場（超電導が完全に壊れてしまわない程度の磁場）の中で使われるケースがほとんどだろう。このため、超電導の混合状態を維持できる温度と磁場の範囲をなるべく広くすることが目標となる。温度も考慮しなければならないのは、超電導体の上部臨界磁場が温度に応じて変わるからだ。臨界温度よりもわずかに低い温度では、上部臨界磁場はゼロに近く、非常に弱い磁場でも超電導が壊れてしまう。温度が低ければ、超電導は強い磁場にも耐えられる（右の図み）。

臨界電流密度の向上

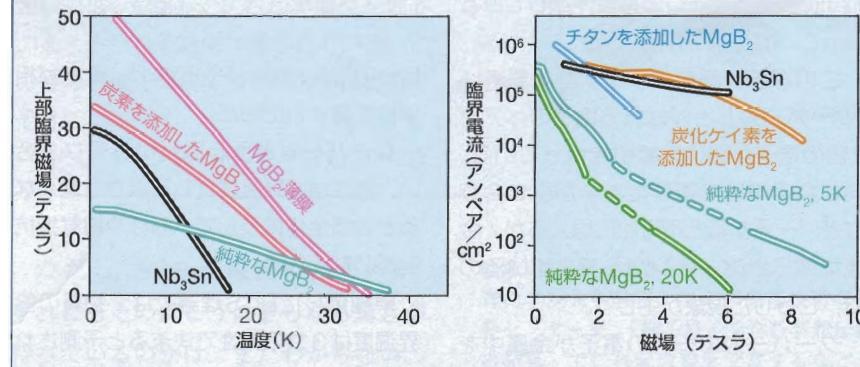
幸い、上部臨界磁場は化合物の製法を変えることで調整でき、ふつうは特定の不純物を添加する方法が使われる。例えばMgB₂のホウ素の一部を炭素に置き換えると、上部臨界磁場は劇的に高まる。私たちを含めいくつかの研究グループは、MgB₂のバルク試料が含むホウ素の5%を炭素に置換すると上部臨界磁場が2倍以上になることを示した。これは素晴らしい改善効果で、重要な意味を持つ。

加えて、ウィスコンシン大学マディソン校のラーバルスタイル（David C. Larbalestier）らのグループは、MgB₂を薄膜にすると上部臨界磁場がさらに高まり、ニオブ三スズ（Nb₃Sn）の値を十分に上回ることを示した。このデータは大きな謎をもたらした。何が原因で上部臨界磁場が上がるのか。少量の酸素だろうか。未知のプロセスで紛れ込んだ他の元素だろうか。それ

不純物添加で性能向上

超電導体を応用するには、磁場中に置いても電流を流しても超電導を維持できることは重要だ。グラフは二ホウ化マグネシウム（MgB₂）に不純物を添加するこれらの性能がどう向上するかを示したもの。現状では、産業分野でよく使われているニオブ三スズ（Nb₃Sn）と同程度かそれを上回る水準だ。

左のグラフからわかるように、炭素を添加したMgB₂の線材と不純物を含んだMgB₂薄膜（不純物の濃度は不明）は、どの温度でもNb₃Snよりも上部臨界磁場が大きい（強い磁場に耐えて超電導を示す）。一方、右のグラフからは、炭化ケイ素（SiC）を添加したMgB₂がNb₃Snとほぼ同等の電流を流せることがわかる。ただし、その他の例はNb₃Snよりも著しく劣る（温度の記入がないものはすべて4Kで測定。破線は推定）。



ともMgB₂薄膜の構造に生じた歪みだろうか？しかし、その答えが何であろうと、MgB₂は超電導磁石の材料としてますます有望となる。この用途に現在よく使われているのはニオブ三スズだが、MgB₂ならもっと高温で使えるうえ、より強い磁場中でも使える磁石が作れることになる。

上部臨界磁場に次いで、特に応用物理学の分野で重視される超電導特性として「臨界電流密度」がある。超電導状態で流せる電流の最大値のことだ。電流密度がこの値を超えると、渦糸（試料中にできた常電導の小さな領域）がずれたり動いたりし始める。渦糸が動き始めるとエネルギーの損失が生じ、電気抵抗がゼロでなくなってしまう。

これを抑えるには、超電導体に適切なタイプの欠陥を導入して渦糸を固定する方法がある（「ピン止め」という）。また、渦糸は結晶粒界にピン止めされるため、個々の結晶粒を小さくして粒

界の表面積を広げると、より多くの渦糸をピン止めできる場合が多い。このほか、イットリウム酸化物や二ホウ化チタンなど別の物質をごく少量添加することによってもピン止めが増える。

MgB₂を実用的な超電導材料にするうえでの大きな課題は、強磁場中の臨界電流密度をいかに高めるかだ。純粋なMgB₂の臨界電流密度は弱い磁場中ではニオブ三スズの値と同等だが、磁場が強くなるとニオブ三スズよりも急激に低下する。MgB₂を磁石として使う場合、強い磁場を作り出すのが目的なのだから、これは都合が悪い。

ただ、この物質の超電導が発見されてからの4年間で、MgB₂の臨界電流密度はかなり改善してきた。弱磁場での臨界電流密度だけでなく、おそらくもっと重要な強磁場中の値も向上している。この分野の研究は非常に活発なので、さらなる改良が期待できるし、どうすればMgB₂に適切なピン止め点

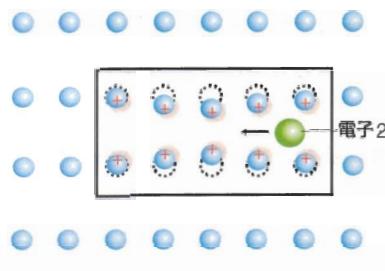
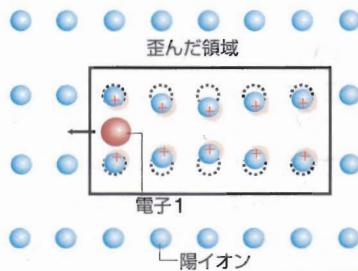
BCS理論の予測

1957年、物理学者のバーディーン(John Bardeen), クーパー(Leon N. Cooper), シュリーファー(J. Robert Schrieffer)は、金属が超電導を起こす根本的なメカニズムを説明する理論を提唱した。3人の頭文字をとって「BCS理論」と呼ばれる。通常の常電導状態にある金属に電気抵抗が生じるのは、電子が格子欠陥で散乱されるためだ。BCS理論によれば、電子が集まって、散乱されずに移動する1つの集合体として振る舞うことで超電導が起こる。

この電子状態を作り出す基本要素は「クーパー対」と呼ばれる電子のペアで、2個の電子が弱い力で引き合っている。同じ負の電荷を帯びた粒子が引き合うなど、一見すると不可能に思えるが、金属は電子と陽イオンからできているので、こうした現象が生じる。

クーパー対の一方の電子が金属中を移動すると、その航跡として陽イオンの位置に歪みが残る。この一時的な正味の正電荷が、別の電子を引き寄せる。こうして、格子の歪みを介して電子がゆるく結びつく（より正確にいうと、特定の振動数の格子振動が電子対の生成に影響する）。やや大雑把なたとえ話をすると、2人の子どもが大きなトランポリンの上で跳びはねている状況に似ている。2人の間には直接的な引力は働いていないが、だんだん近付いていく。おのおのが

超電導金属の結晶格子



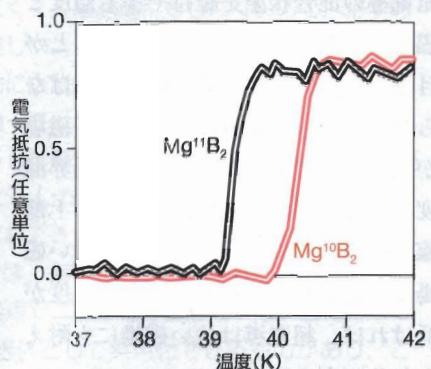
クーパー対と呼ばれる電子対の形成が原因となって超電導が起こる。金属内を1個の電子が移動すると、その航跡として陽イオンの格子に歪みが生じる（左）。その後間もなく、寄り集まつた正電荷に別の電子が引き寄せられる（右）。これら2つの電子は事実上、相互に弱く引き付けあっていると考えることができる。

自分の足元のシートを歪ませ、それが相手に影響するためだ。

クーパー対どうしは互いに重なり合い、温度が臨界温度(T_c)よりも低くなると金属全体に及んで、もはや電気抵抗を感じなくなる。

単純化したBCS理論では、物質の臨界温度は3つの特性で決まるとして予測される。超電導状態に寄与する電子の数、クーパー対の生成に寄与する格子振動の固有振動数、格子の歪みに電子が引き寄せられる強さの3つで、電子の数が多いほど、振動数が大きいほど、相互作用が強いほど、臨界温度は高くなる。

過去数十年間、これら互いに関連する3つの特性を最適化することによって、より高い臨界温度を実現しようと試みられてきた。特に重視されたのは最初の2つの特性だ。しかし、 MgB_2 が高い臨



MgB_2 は臨界温度の40Kよりも低温に冷やすと急に電気抵抗を失う。純粋なホウ素10で作った試料とホウ素11で作った試料とでは臨界温度に差がある。同位体によって臨界温度に明確な違いが生じるのはBCS理論から予測される結果なので、 MgB_2 の超電導は従来のBCS超電導と同じメカニズムによると考えられる。

界温度を示す原因是、電子と格子との相互作用が強いこと、つまり3つ目の特性によるようだ。

(P. C. キャンフィールド / S. L. バドコ)

を導入できるかについても理解が進むとみられる。

既成概念を打破した先に

MgB_2 の超電導発見は、過去数十年にわたる超電導研究の中で生まれた成果であるとともに、私たち人間が自然を解明しようとして編み出した経験則に自然が従ってくれるとは限らないことを思い知らせる出来事でもあった。

MgB_2 は50年も前から知られていたにもかかわらず、その超電導性を調べ

る者は長らく誰もいなかった。超電導を示しそうな金属間化合物について既成概念ができあがり、 MgB_2 がそれに合わなかつたのが一因だ。しかし、新材料や新しい性質を探索する私たちの耳に、先入観という騒音にかき消されず、なおも自然の声が届くのは幸いだ。

過去4年間で、 MgB_2 の超電導に関する理解は猛烈な速さで進んできた。高純度 MgB_2 の特性は明確にわかつたし、この物質にどう手を加えれば臨界磁場や電流密度を向上して実用につなげら

れるかも明らかになりつつある。特に20~30Kでの特性は、磁石など大きな電流密度が求められる用途にも使える水準に達しており、液体水素や液体ネオン、密閉サイクル式冷凍機で冷やせば実現可能だ。

被覆線材や磁石の試作も進んでいる。ただし、 MgB_2 の超電導特性を最大限に引き出し、 MgB_2 や被覆材料の候補となる物質について金属学的に深く理解するには、さらに研究が必要だ。

総じていえば、 MgB_2 の将来は実に

高温をもたらす構造

二ホウ化マグネシウム (MgB_2) が驚くほど高い臨界温度を示す原因の1つは、電子と格子振動との相互作用が強いことにある。この強い相互作用は MgB_2 の構造と原子間結合に起因している。

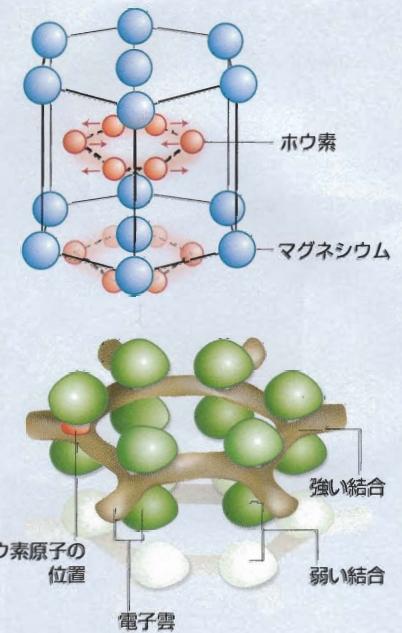
MgB_2 中のホウ素原子は六角形の蜂の巣状パターン（右上の図、赤）を形成していて、この層がマグネシウムの層（青）と交互に並んでいる。電気伝導を担うのはホウ素の層にある電子で（これは常電導でも超電導でも同じ）、これらの電子はホウ素原⼦どうしを結びつける2種類の結合のいずれかをなしている（右下の図）。同じ層のホウ素原⼦の結合は非常に強いが、隣の層のホウ素原⼦との結合

はずっと弱い。

平面内の結合に関与している伝導電子は、平面内の格子振動（右上図の矢印）から非常に強い影響を受ける。この強い相互作用（カップリング）のおかげで、高温でも超電導状態が維持される。

MgB_2 の出現で、ごく基本的で興味深い疑問が再び浮上した。同じ物質の中で異なる2つの電子集団（右下図の緑と金）がそれぞれ別のクーパー対を生成し、これらがともに寄与して超電導を引き起こす場合があるかどうか、という疑問だ。実験では、 MgB_2 でこれが実際に起きているとみられる結果が得られている。この種の現象を明確に示す初の物質となりそうだ。

（P. C. キャンフィールド／S. L. バドコ）



LUCY READING-IKANADA

有望に思える。社会が水素経済へ移行すれば、 MgB_2 は本領を発揮するだろう。大量の水素が小型のペブルベッド減速型原子炉などで生産されるようになると（J. A. レークほか「動き出した次世代原子炉計画」日経サイエンス2002年4月号）、何らかの方法で水素を運ぶ必要が出てくる。水素を液化し、水素の沸点（20K）よりも低温に保たれた輸送用パイプを通して送るのが1つの方法だ。こうしたパイプに沿って MgB_2 のケーブルを配置すれば、無損失の送電が可能になるだろう。いまはまだ SFじみて聞こえるだろうが、この構想は真剣に検討されている。

初めて銅酸化物系の超電導体が発見されて以来、超電導を示すさまざまな銅酸化物が見つかった。しかし MgB_2 の場合は、これまでの4年間で例外的に高い臨界温度を持つ類似の化合物は見つかっていない。酸化物超電導体の発見はまったく新しい大陸（探検しがいのある広大な大陸）の発見に匹敵するが、これに対し MgB_2 超電導の発見は探検し尽くされた群島のはずれで新島を1つ見つけたようなものだ。

ただし、 MgB_2 が最後の島なのか、それともその向こうにさらなる驚きが待っているのかは、まだわからない。

（翻訳協力：勅使河原まゆみ）

監修 秋光純（あきみつ・じゅん）

青山学院大学教授、同大学先端技術研究開発センター長。「梯子格子を含む新超伝導体の発見」で仁科記念賞を受賞するなど、超電導研究をリードしてきた。二ホウ化マグネシウムの超電導を世界に先駆けて報告。

著者 Paul C. Canfield / Sergey L. Bud'ko

2人はアイオワ州にある米エネルギー省のエイムズ研究所に勤務している。キャンフィールドはアイオワ州立大学の物理学と天文学の教授でもあり、主に新素材の設計、発見、改変、特性の解明や、低温下での金属化合物の電子状態や磁気状態の研究に取り組んでいる。バドコは新素材の熱力学的特性や磁気特性、輸送特性のほか、金属や半金属の量子振動、さらには高圧・強磁場・低温の極限環境下での物質の物理特性に専門を持っている。

原題名

Low-Temperature Superconductivity Is Warming Up (SCIENTIFIC AMERICAN April 2005)

もっと知るには…

SUPERCONDUCTIVITY AT 39 K IN MAGNESIUM DIBORIDE. Jun Nagamatsu, Jun Akimistu et al. in *Nature*, Vol. 410, pages 63–64; March 1, 2001.

「新しい金属系超電導体の発見」秋光純、日経サイエンス2001年6月号

「超電導物質に新たな系譜」蓑健一郎、日経サイエンス2001年5月号TOPICS

「エキゾチックなホウ素化合物 MgB_2 の発見秘話」秋光純、パリティ Vol. 16 No. 7 (2001) 50-51.

『いままた高溫超伝導』パリティ編集委員会編、丸善、2002年、1680円（税込み）

MAGNESIUM DIBORIDE: ONE YEAR ON. Paul C. Canfield and Sergey L. Bud'ko in *Physics World*, Vol. 15, No. 1, pages 29–34; January 2002.

ENERGY FOR THE CITY OF THE FUTURE. Paul M. Grant in *Industrial Physicist*, Vol. 8, No. 1, pages 22–25; February/March 2002. この論文は <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf> で入手可能。

MAGNESIUM DIBORIDE: BETTER LATE THAN NEVER. Paul C. Canfield and George W. Crabtree in *Physics Today*, Vol. 56, No. 3, pages 34–40; March 2003.

SUPERCONDUCTIVITY IN MgB_2 : ELECTRONS, PHONONS AND VORTICES. Edited by Wai Kwok, George W. Crabtree, Sergey L. Bud'ko and Paul C. Canfield. *Physica C*, Vol. 385, Nos. 1–2; March 2003.